

in Universalia 1994, Encyclopædia Universalis, Paris, 1994, p. 392-293.

ACTUALITE DE LA PENSEE D'EINSTEIN

Depuis les commémorations et l'avalanche de publications qui ont marqué son centenaire, en 1979, l'intérêt pour l'oeuvre et la pensée d'Einstein ne s'est pas démenti. On épiloguera peut-être sur les raisons de la persistance du mythe quand tant de changements sont survenus, au cours des dernières décennies, dans les représentations de la science et dans les attitudes devant ses effets. Les "écologistes" eux-mêmes semblent ne pas trop lui en vouloir d'avoir "commis le péché" (ayant lâché dans le monde, en ouvrant la boîte de Pandore de la formule $E = mc^2$, l'énergie nucléaire et la bombe). Comme si les photographies répandues d'Einstein à bicyclette ou - celle-ci jusque sur les affiches publicitaires - tirant la langue, l'avaient apprivoisé à leurs yeux. Il est vrai aussi que son image de "savant" est ambiguë. Mais les technocrates du complexe industriel et militaire se sont fait reconnaître, et les membres les plus contestataires de nos sociétés ne sont pas loin d'admettre comme l'un des leurs le savant aux cheveux longs et mal peignés et au doux regard perdu sur l'horizon qui, mâchant son tuyau d'ébonite, a écrit un jour: "Je tiens que fumer la pipe contribue à la tranquillité et à l'objectivité des jugements dans toutes les affaires humaines"¹.

Mais ce n'est pas la survivance du mythe qui nous retiendra dans ce qui suit. (Le mythe, on le voit naître vers 1919, à la faveur de l'annonce de l'observation de la courbure des rayons lumineux au voisinage du Soleil, faite par la double expédition au Brésil et en Afrique sous la direction d'Eddington, qui ouvrit largement la voie à la "réception" sur une large échelle de la théorie de la relativité générale et, dans ses fourgons, de la relativité restreinte², et aux conceptions de l'espace-temps indissoluble et lié à la matière. Des

¹ Nous avons, avec le regretté Gerald Tauber, déniché en 1987, aux Archives Einstein, cette inscription dans les papiers du savant quand, à l'Université de Boston comme ailleurs, les campagnes anti-fumée s'accompagnaient de quelque intolérance...

² Sur ces circonstances, voir Paty (1987) et (1993a), chapitres 4 et 5.

ouvrages récents donnent, de cette réception, de bonnes descriptions et analyses)³. A l'heure où tant d'acteurs illustres sont rentrés dans l'ombre aussitôt quittée la scène intellectuelle, il est en tout cas remarquable que - mythe ou réalité - la figure d'Einstein soit très présente aujourd'hui même parmi nous. Je parle cette fois du monde de la science et des idées.

Quant au premier, on doit invoquer le saisissant renouveau d'intérêt pour sa théorie de la Relativité générale qui, malgré des débuts éclatants, avait connu une longue éclipse. Elle n'avait alors à son actif que trois prédictions, l'avance du périhélie de la planète Mercure, le ralentissement des horloges et le décalage vers le rouge des vibrations lumineuses dans un champ de gravitation. Bien qu'elles fussent vérifiées, cela faisait peu pour les physiciens que sollicitait par ailleurs l'explication d'un autre genre de phénomènes et de très nombreuses données d'observation: les physiques atomique, nucléaire, des particules élémentaires, se désemboîtaient les unes des autres et se développaient sous le signe de la mécanique quantique et de la théorie quantique des champs, dont les canons étaient bien différents de ceux de la théorie favorite d'Einstein... Celui-ci parut alors démodé aux yeux d'une majorité de scientifiques - sans cependant que son mythe en souffrît vraiment : on le célébra comme un grand savant du passé encore vivant. Si la Relativité générale demeura un objet d'étude, ce fut essentiellement pour les mathématiciens, jusqu'à ce que les développements de la cosmologie et de l'astrophysique la remettent en selle comme théorie des phénomènes de la nature, désormais indispensable.

L'observation inattendue par Penzias et Wilson, en 1965, du rayonnement radio isotrope du fond du ciel, les mesures de l'abondance de l'hélium, et d'autres considérations, conférèrent un poids considérable à la cosmologie de l'univers en expansion, attestée par la fuite des galaxies, et plus précisément à l'hypothèse de l'"explosion originelle" ou "big-bang", très vite promue au rang de "modèle standard" de l'histoire de l'évolution de l'Univers. Or la Relativité générale, on le sait, est la théorie fondamentale de la cosmologie. D'autres découvertes d'astrophysique, comme celles des

³ Biezunski (1992), Glick (1987), Howard et Stachel (1989), Eisenstaedt et Kox (1992).

pulsars, des quasars, ainsi que d'objets de très grandes densités de matière, n'ont cessé depuis lors de fournir des tests, en grand nombre et d'une extrême précision, de la Relativité générale ⁴.

Nul pratiquement ne doute, aujourd'hui, que ses deux prédictions les plus audacieuses, les ondes de gravitation et l'existence de trous noirs, toutes deux comme effets de la courbure de l'espace-temps (variation dans le premier cas, forte courbure faisant retomber la lumière dans le second), seront directement vérifiées dans un futur prochain, considérant d'ailleurs qu'elles le sont déjà de manière indirecte. On dénombre, en effet, plusieurs candidats probables au titre de trous noirs, l'étude théorique des scénarios d'évolution de la vie des étoiles ayant par ailleurs banalisé le concept de tels objets, résidus attendus en général d'explosions comme les supernovæ. D'un autre côté, les propriétés des pulsars binaires ou étoiles doubles à pulsars (ces derniers sont des étoiles à neutrons dont la fréquence de rotation sur elles-mêmes est très grande) semblent bien indiquer des effets d'onde de gravitation⁵.

Par ailleurs, l'astrophysique et la cosmologie viennent, depuis moins de deux décennies, de lier leur sort à la physique des particules fondamentales, cette dernière étant appelée à rendre compte des états de la matière dans les toutes premières phases de l'évolution de l'Univers, posant par là-même la nécessité de réconcilier, et d'unifier, à son stade préliminaire, la théorie quantique et la théorie de la gravitation, c'est-à-dire la Relativité générale⁶.

Tous ces développements récents rappellent à leur manière l'actualité de la pensée et de l'oeuvre d'Einstein, inventeur de la théorie qui a permis de les concevoir. La fascination qu'ils exercent témoigne peut-être de ce que notre Univers est devenu plus proche de nos préoccupations depuis que la Terre s'est singulièrement rétrécie, à l'heure des vols supersoniques, de la banalisation des satellites et de la "communication" instantanée, universelle et obligatoire de

⁴ Les ouvrages de la série des *Einstein Studies*, publiée par le Einstein Study Center de l'Université de Boston, et dirigée par John Stachel et Don Howard aux éditions Birkhauser, qui compte actuellement quatre volumes parus, sont consacrés aussi bien à l'état des travaux actuels sur la théorie de la Relativité générale qu'à des études historiques et épistémologiques: nous citons plus bas les n°s 1 et 3 de la série, plus historiques.

⁵ Le prix Nobel de physique de 1993 vient d'être attribué à Russell Hulse et Joseph Taylor qui découvrirent le premier pulsar binaire, en 1974.

⁶ Voir, p. ex., Audouze, Musset, Paty (1990).

l'information d'un point à un autre du globe...

Mais cette actualité se marque aussi par un intérêt renouvelé pour la pensée d'Einstein elle-même, et non seulement pour "ses oeuvres", au sens de leur effet sur nos connaissances. Certes, les deux ne sont pas séparés, et si l'on s'attache à l'étude de sa pensée, c'est en tant qu'elle fut créatrice d'une oeuvre scientifique d'une importance considérable et peut-être inégalée - sinon peut-être, en son temps, par Newton, qui renouvela aussi l'image de l'univers.

Or, c'est souvent de seconde - voire de *nième* - main que cette pensée a été commentée et interprétée, comme on le voit non seulement dans les publications destinées au grand public et dans les manuels de physique, mais aussi dans des ouvrages de philosophie. Une vulgate - telle est sans doute la rançon du mythe - a propagé une vision déformée de ses cheminements créateurs et de ses conceptions. Il était urgent de revenir aux textes, d'en favoriser l'accès par des éditions plus systématiques que les quelques recueils disponibles - au demeurant dans des traductions qui laissaient à désirer.

Une édition critique et chronologique de l'ensemble des écrits d'Einstein a été entreprise depuis plusieurs années aux Presses de l'Université de Princeton, par le Centre d'Etudes sur Einstein de l'Université de Boston, sous la direction de John Stachel puis récemment de Martin Klein. Ce Centre fournit par ailleurs généreusement l'accès aux archives du savant - dont les originaux sont conservés à l'Université hébraïque de Jérusalem -, lesquelles comprennent un vaste ensemble de documents, manuscrits de textes publiés ou inédits et lettres à des correspondants, qui se comptent par milliers. Les deux premiers volumes des *Collected papers of Albert Einstein* ont été publiés à ce jour ⁷. Le premier, qui porte sur les premières années, à savoir la période 1879-1902, a notamment révélé des lettres de jeunesse⁸ extrêmement précieuses pour connaître la genèse de sa pensée et de ses premières recherches en physique, en thermodynamique et en électrodynamique, d'où allaient jaillir ses

⁷ Einstein (1987-). Les textes sont dans la langue originale (l'allemand pour ces premiers volumes), tandis que l'appareil critique est en anglais. Chaque volume, relié, est accompagné d'un volume complémentaire, broché, contenant une traduction en anglais des textes originaux.

⁸ Les lettres à sa fiancée Mileva Maric, qui y figurent, ont fait aussi l'objet d'une publication séparée - bonne affaire pour les éditeurs qui espèrent faire profit des aspects anecdotiques, jetant en pâture au public les premières amours d'Einstein : Einstein (1993).

travaux fondamentaux sur la physique moléculaire, sur le rayonnement et les quanta, et sur la relativité restreinte. Ces contributions décisives, qui marquent l'année d'or 1905, trouvent place dans le second volume, sur "les années suisses", de 1900 à 1909. Ce tome comporte donc aussi les prolongements remarquables que sont l'article de 1907 dans lequel Einstein dessine son programme vers la Relativité générale, ainsi que les travaux qui étendent l'hypothèse quantique du rayonnement à la physique atomique et posent la dualité "ondulatoire et quantique" de la lumière. En particulier, les premiers textes d'avant 1905 permettent de suivre son cheminement en thermodynamique et de comprendre la manière fondamentale (et non "empirique") par laquelle Einstein aborda le domaine des atomes et des quanta.

Une édition d'oeuvres choisies, traduites en français et commentées par des spécialistes, vient tout récemment de donner ses derniers volumes (ceux sur la Relativité). L'ensemble offre, en six tomes, les textes les plus importants d'Einstein, tant scientifiques qu'épistémologiques et philosophiques ou concernant l'éthique et la politique⁹. Cette publication fournit, en l'état actuel des choses, outre des traductions de qualité, un complément actuel à l'édition originale intégrale, encore embryonnaire et qui s'étalera vraisemblablement encore sur de nombreuses années, pour une cinquantaine de volumes.

Bien entendu, les historiens des sciences n'avaient pas attendu ces publications pour se mettre au travail. Il est impossible de faire état de toutes les études récemment parues sur Einstein, sa vie, son oeuvre et sa pensée, et la bibliographie que nous pouvons en donner ici est très incomplète.

Einstein avait indiqué lui-même que sa vie et sa pensée sont indissociables, et les essais biographiques le rendent à l'évidence. Le livre d'Abraham Pais, qui date de 1982 et reste à ce jour sa biographie scientifique la plus complète, vient d'être traduit en français¹⁰. Son titre original était "Le Seigneur est subtil, mais il n'est pas méchant...". On sait qu'Einstein exprima un jour ainsi le caractère indirect et abstrait de notre représentation théorique du monde physique, et sa conviction que ce monde, difficile d'accès, est

⁹ Einstein (1989-1993).

¹⁰ Pais (1992).

cependant intelligible. A sa manière, le livre de Pais est une riche illustration de cette pensée vécue. L'auteur, physicien connu, s'est fait historien et a eu largement recours aux inédits d'archives. Il nous emmène au long du parcours d'Einstein dans sa longue quête, qui débute au tournant du siècle et ne s'achèvera qu'avec sa mort, en 1955, d'une image cohérente des phénomènes et de la réalité physiques. Nous suivons, presque au jour le jour, et en relation au contexte des connaissances du temps et des travaux des autres physiciens, l'état de ses recherches en relativité restreinte et générale, en thermodynamique et en physique quantique, en cosmologie et sur la théorie unitaire. L'information la plus précise se trouve ici recueillie, avec une grande objectivité. L'auteur s'est gardé d'interpréter la pensée d'Einstein, se défendant de faire oeuvre de philosophe. La seule critique à faire à cette approche presque exhaustive est l'extrême concision sur les critiques d'Einstein à l'interprétation de la mécanique quantique. A l'évidence, Pais minimise cette part de la pensée du savant. Pour le reste, cette biographie scientifique est un ouvrage essentiel de référence. Son auteur lui prépare une suite, sur des aspects plus ordinaires de sa vie - sur ses conceptions religieuses, sur ses rapports avec la presse, etc. - dont la parution est imminente, sous le titre *Einstein vivait ici*¹¹. (On se souvient de ce dessin, paru dans un périodique au moment de sa mort, d'un panneau portant cette inscription, planté dans un coin du cosmos, sur notre Terre - si évocateur de l'enracinement humain du savant et de l'ouverture des cieux que nous rappelions plus haut).

Le livre que Jacques Merleau-Ponty, philosophe et spécialiste bien connu de l'histoire des idées cosmologiques et de la cosmologie contemporaine, vient de consacrer récemment à la vie et à l'oeuvre d'Einstein¹², est davantage dirigé vers un grand public. Cela ne l'empêche pas de présenter avec beaucoup de profondeur et de précision les idées scientifiques majeures du savant, et l'on admirera en particulier ce qui touche au cheminement vers la Relativité générale et la cosmologie. L'auteur aborde aussi les conceptions philosophiques d'Einstein, ainsi que ses idées politiques et son rapport à la judaïté. L'on a ainsi un portrait à peu près complet

¹¹ Pais (à paraître): Abraham Pais, communication privée, lettre du 3.9.1993.

¹² Merleau-Ponty (1992).

d'Einstein comme homme, citoyen, physicien et penseur, dont on pourra bien entendu discuter certains des traits, mais qui place le lecteur devant la pleine dimension de l'homme de pensée que fut l'inventeur de la Relativité, sans sacrifier aux images faciles ou déformantes, et que marque un grand souci d'objectivité.

Quant aux études qui, par-delà les aspects biographiques, s'attachent de manière détaillée aux recherches ou à la pensée scientifique, épistémologique et philosophique d'Einstein, elles contribuent à faire mieux comprendre la nature de ses conceptions, et en premier lieu dans son travail même, en s'efforçant de retracer sa démarche à travers les documents disponibles, éclairant la "manière einsteinienne de faire de la physique", dans les différentes directions de ces recherches¹³, c'est-à-dire son "style scientifique" propre.

Des analyses récentes sur la genèse de la théorie de la relativité, restreinte et générale, malgré leur différence de perspective - la méthodologie des programmes de recherche, pour Elie Zahar qui présente son ouvrage *Einstein's revolution* comme un "manuel sur la relativité" "écrit d'un point de vue historico-méthodologique", l'épistémologie historique et comparative pour notre *Einstein philosophe* ¹⁴ -, font voir des convergences intéressantes qui s'inscrivent contre plusieurs idées reçues. Elles mettent notamment en évidence la rationalité qui se trouve à l'oeuvre dans le travail d'élaboration théorique et de "découverte", et démontrent qu'Einstein ne suivait nullement l'épistémologie de Mach, empiriste et positiviste, dans ses premières recherches. L'étude comparative d'autres travaux voisins et pratiquement simultanés (ceux de Lorentz et de Poincaré), dans le cas de la Relativité restreinte, éclaire la spécificité de l'approche d'Einstein, les traits de son 'style' de pensée scientifique qui caractérise sa formulation propre des problèmes. Celle-ci aboutit à la mise en évidence d'une difficulté qu'il est le seul à désigner comme telle et qui détermine la voie de la solution: à savoir, la confrontation de principes théoriques, résultant d'un choix prioritaire de ces derniers (le principe de relativité et celui de constance de la vitesse de la lumière), pour réformer l'une par l'autre, en gardant ce qu'elles ont de fondamental et d'universel malgré leurs insuffisances, les deux

¹³ Voir la bibliographie.

¹⁴ Zahar (1989), Paty (1993a).

théories en concurrence, la mécanique et la théorie de l'éther électromagnétique.

L'examen des travaux d'Einstein dans les différents domaines, de la théorie de la relativité générale à la physique quantique confirme ce trait général de son style de chercheur, qui fait sa singularité, d'être orienté avant tout vers une analyse des bases fondamentales des théories et du contenu physique des concepts en jeu dans les phénomènes considérés. Ce type d'approche est particulièrement sensible aux interpénétrations mutuelles de la physique et de la philosophie, concernant aussi bien l'imprégnation philosophique des problèmes scientifiques que la nécessité, pour les interprétations philosophiques de certaines questions - la nature de l'espace et du temps, ou le rapport de la géométrie à la physique, par exemple -, de ne pas perdre de vue ce qui en conditionne l'intelligibilité, à savoir le caractère de construction effective de la théorie physique qui amène à les poser¹⁵.

Les travaux d'Einstein sur les quanta ont également fait l'objet d'études qui ont mis en évidence, pour la période d'élaboration de la "première théorie quantique", son originalité par rapport à Planck, au point de faire voir que c'est lui a véritablement introduit les quanta comme hypothèse physique¹⁶, et montrent, d'autre part, la continuité de ses préoccupations et la permanence de son 'style' de recherche dans cette période - qui s'étend jusqu'à 1925 - et la nature de ses critiques dans la phase ultérieure de la mécanique quantique¹⁷. Einstein s'y montre toujours préoccupé du caractère fondamental ou non de la théorie, et développe des considérations et des critères qui permettent d'en juger, de se prononcer sur l'interprétation des concepts et des propositions théoriques. Tout en affirmant la nécessaire autonomie de l'interprétation physique, il réclame de la théorie physique qu'elle satisfasse certaines exigences théoriques et méta-théoriques (ou épistémologiques), qui se présentent dans un ordre de priorité où le réalisme est strictement requis tandis que la question du déterminisme n'est que secondaire et dérivée. De ce que les partisans du programme des 'variables cachées', pour compléter la

¹⁵ Paty (1993a), chapitres 6 et 7.

¹⁶ Einstein (1989-1993), Darrigol (1989).

¹⁷ Stachel (1986), Paty (à paraître).

mécanique quantique d'une manière déterministe, se sont appuyés sur les objections d'Einstein, l'on a souvent cru que telle était aussi sa position de ce dernier: or il ne partageait pas ces conceptions, et la nature de ses critiques de l'interprétation orthodoxe est toute autre. On soulignera enfin qu'il a mis le doigt sur l'incompatibilité de la mécanique quantique avec une séparabilité locale des systèmes physiques individuels - dont il a formulé le concept¹⁸.

La pensée d'Einstein apparaît ainsi, même dans son application à la physique, par la préoccupation constante pour ce qui est 'fondamental', comme inséparable d'une attitude philosophique, d'une quête ardente (celle d'une "image du monde"), marquée par une permanente remise en question des certitudes. Par-delà l'oeuvre en physique, cette pensée fut aussi directement philosophique, s'interrogeant en une réflexion riche et profonde, informée de sa propre expérience vécue, sur la connaissance, sur la nature et sur l'homme. Sa philosophie de la connaissance qui est, essentiellement, pensée de la réalité du monde et de la possibilité de connaître cette réalité, donne en particulier des éclairages précieux sur le statut des principes et des concepts, sur les notions d'unité et de simplicité, et enfin sur le réel - objet véritable et ultime de la théorie, mais jamais atteint, et qui est donc porté au rang de programme et de référence de nos représentations.

¹⁸ Paty (à paraître).

BIBLIOGRAPHIE.

OEUVRES D'EINSTEIN

EINSTEIN, Albert (1987-). *The Collected papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987-. Vol. 1: *The early years, 1879-1902*. Edited by J. Stachel, D.C. Cassidy, R. Schulmann, J. Renn and R. Summerfield, 1987. Vol. 2: *The Swiss years: Writings: 1900-1909*. Edited by John Stachel, David Cassidy, Jürgen Renne, Roberte Schulmann, Don Howard, A.J. Kox, Ann Lehar, 1989.

- (1989-1993). *Oeuvres choisies*, trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud *et al.*, édition publiée sous la dir. de Françoise Balibar. Seuil/éd. du CNRS, Paris. Vol. 1: *Mécanique statistique et physique quantique* (éd. par F. Balibar, Bruno Jech et Olivier Darrigol), 1989. Vol. 2: *Relativités, 1* (éd. par), 1993. Vol. 3 : *Relativités, 2* (éd. par), 1993. Vol. 4: *Correspondance française* (éd. par Michel Biezunski), 1989. Vol. 5: *Science, éthique, philosophie* (éd. par Jacques Merleau-Ponty et F. Balibar), 1991. Vol. 6: (éd. par). *Album Einstein*, 1993.

- (1992?) trad. de Einstein on peace, Hermann, Paris, 1992 ?

- (1993). *Lettres d'amour et de jeunesse*, trad., Seuil, Paris, 1993.

OUVRAGES

AUDOUZE, Jean; MUSSET, Paul; PATY, Michel (eds) (1990). *Les particules et l'univers. La rencontre de la physique des particules, de l'astrophysique et de la cosmologie*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.

BIEZUNSKI, Michel, *Einstein à Paris*, Presses Universitaires de Vincennes, Paris, 1992.

DARRIGOL, Olivier, Einstein et la discontinuité quantique, *La Recherche* 21, 1990 (N° 220, avril), 446-453.

EISENSTAEDT, Jean et KOX, A.J. (eds) (1992). *Studies in the history of General relativity*, Birkhauser, Boston, Basel, Berlin, 1992.

FINE, Arthur, *The shaky game. Einstein realism and the quantum theory*, The University of Chicago Press, Chicago, 1986.

GLICK, Thomas (ed.) (1987). *The comparative reception of relativity*, Reidel, Dordrecht, 1987.

HOWARD, Don (1984). Realism and conventionalism in Einstein's philosophy of science: The Einstein-Schlick correspondence, *Philosophia Naturalis* 21, n°3-4 (Special issue: *Philosophy of science, History of science*), 616-629.

HOWARD, Don et STACHEL, John (eds) (1989). *Einstein and the history of General relativity*, Birkhauser, Boston, Basel, Berlin, 1989.

KERZBERG, Pierre (1989). *The invented Universe: the Einstein-de Sitter controversy (1916-17) and the rise of relativistic cosmology*, Clarendon Press, Oxford, 1989.

LOPES, José Leite 1992. *Théorie relativiste de la gravitation: une introduction*, Masson, Paris, 1993.

MERLEAU-PONTY, Jacques (1992). *Einstein*, Flammarion, Paris, 1993.

PAIS, Abraham (1982). *Subtle is the Lord. The science and life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982. Trad. fr. par Christian Jeanmougin et Hélène Seyrès, *Albert Einstein, la vie et l'oeuvre*, Interédiitions, Paris, 1992.

- (à paraître). *Einstein lived here*, Clarendon Press/ Oxford University Press, Oxford/New York (à paraître).

PATY, Michel (1986a). Einstein and Spinoza, in Marjorie Grene and Debra Nails (eds), *Spinoza and the sciences*, Reidel, Dordrecht, 1986, p. 267-302.

- (1986b). Einstein et l'arme atomique: la responsabilité des scientifiques, *La Pensée*, n° 250, mars-avril 1986, 51-62.

- (1987). Einstein et la pensée de Newton, *La Pensée*, n° 259, 1987, 17-3.

- (1992) Physical Geometry and Special Relativity: Einstein and Poincaré, in Boi, L., Flament, D. et Salanski, J.-M. (eds), *1830-1930: un siècle de géométrie, de C.F. Gauss et B. Riemann à H.*

Poincaré et E. Cartan. Epistémologie, histoire et mathématiques, Springer-Verlag, 1992, p. 127-149.

- (1993a). *Einstein philosophe*, P.U.F., Paris, 1993.

- (1993b). Sur les variables cachées de la mécanique quantique: Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie, *La Pensée*, n°292, mars-avril 1993, 93-116.

- (à paraître). *Einstein, les quanta et le réel* (à paraître).

STACHEL, John (1986). "Einstein and the quantum : fifty years of struggle", in Colodny, Robert (ed.), *From quarks to quasars*, University of Pittsburg Press, Pittsburg, 1986.

ZAHAR, Elie (1989). *Einstein's revolution. A study in heuristics*, Open Court, La Salle (Ill.), 1989.

Michel PATY